

DOCUMENT-IDENTIFIER: JP 06128730 A

PAT-NO: JP406128730A  
DOCUMENT-IDENTIFIER: JP 06128730 A  
TITLE: PRODUCTION OF METALLIC THIN FILM  
PUBN-DATE: May 10, 1994

## INVENTOR-INFORMATION:

NAME	COUNTRY
SASAGAWA, KOICHI	
UMEDA, TOSHIRO	
KAWAMATA, KATSUhide	

## ASSIGNEE-INFORMATION:

NAME	COUNTRY
NIKON CORP N/A	

APPL-NO: JP04281917  
APPL-DATE: October 20, 1992

INT-CL (IPC): C23C014/32 , C23C014/08 , C23C014/24

US-CL-CURRENT: 427/531, 427/570, 427/580

## ABSTRACT:

PURPOSE: To efficiently form a metallic thin film at the time of vapor-depositing a metal on a substrate by ion plating by utilizing an arc-discharge ion plating device provided with a pressure-gradient plasma producing means.

CONSTITUTION: A vessel 6 is provided with a rotary holder 18 as a cathode to which plural specularly polished quartz glass substrates 12 are fixed and a means 7 as an anode contg. a metal such as Al. The vessel is evacuated, a discharge gas of Ar, etc., is introduced from a gas inlet 1 in an electron gun 50 as a plasma producing means to form an Ar plasma current 13 by the arc discharge generated by the electron gun 50, the plasma is converged by a magnet 8 to irradiate the Al in the means 7 which is vaporized, and the Al is deposited on the substrate 12. In this case, the vessel 6 having the means 7 is controlled to  $\leq 5 \times 10^{-4}$  Torr which is lower than the pressure in a first vacuum space 51 to produce the plasma, and an Al thin film is efficiently formed on the substrate 12.

COPYRIGHT: (C)1994, JPO&amp;Japio

(19)日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11)特許出願公開番号

特開平6-128730

(43)公開日 平成6年(1994)5月10日

(51)Int.Cl. <sup>5</sup>	識別記号	庁内整理番号	FI	技術表示箇所
C 2 3 C	14/32	9271-4K		
	14/08	9271-4K		
	14/24	9271-4K		

審査請求 未請求 請求項の数1(全 6 頁)

(21)出願番号 特願平4-281917

(22)出願日 平成4年(1992)10月20日

(71)出願人 000004112

株式会社ニコン

東京都千代田区丸の内3丁目2番3号

(72)発明者 笹川 孝市

東京都千代田区丸の内3丁目2番3号 株式会社ニコン内

(72)発明者 梅田 俊郎

東京都千代田区丸の内3丁目2番3号 株式会社ニコン内

(72)発明者 川又 克英

東京都千代田区丸の内3丁目2番3号 株式会社ニコン内

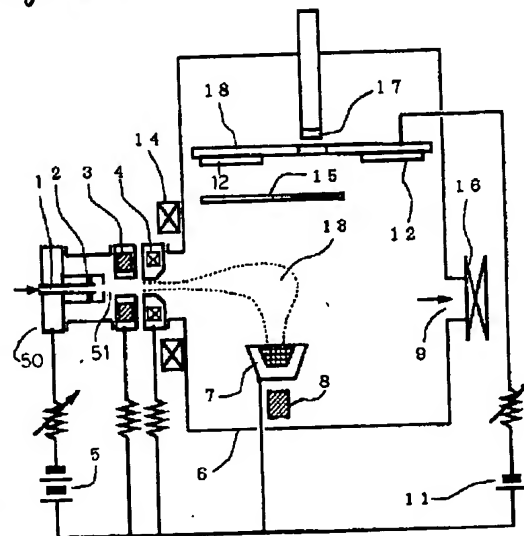
(54)【発明の名称】 金属薄膜の製造方法

(57)【要約】

【目的】高反射率の金属薄膜を効率良く製造する。

【構成】所定の圧力に設定された第1の真空空間51中でアーク放電によりプラズマを生成し、該プラズマを前記第1の真空空間よりも低い圧力に設定された第2の真空空間(真空容器6内)に設置された蒸着源に照射することで該第2の真空空間中で成膜を行うアーク放電型イオンプレーティングによる金属薄膜の製造方法において、前記第2の真空空間の成膜時の圧力を $5 \times 10^{-4}$ Torr以下に設定した。

$I = 940 \text{ mA} \text{ (Ar)}$



$P_6$  controlled to  $\leq 5 \times 10^{-4} \text{ torr} < P_{51} (1 \text{ torr})$   
( $2 \times 10^{-3} \text{ torr}$ )  
↑  
1st vacuum space

6= vessel  
12= substrates on rotating holder 18  
7= anode containing metal (Al)

## 【特許請求の範囲】

【請求項1】 所定の圧力に設定された第1の真空中間でアーク放電によりプラズマを生成し、該プラズマを前記第1の真空中間よりも低い圧力に設定された第2の真空中間に設置された蒸着源に照射することで該第2の真空中間で成膜を行うアーク放電型イオンプレーティングによる金属薄膜の製造方法において、前記第2の真空中間の成膜時の圧力を $5 \times 10^{-4}$  Torr以下に設定したことを特徴とする金属薄膜の製造方法。

## 【発明の詳細な説明】

## 【0001】

【産業上の利用分野】本発明は、圧力勾配型プラズマ生成手段から発生したプラズマを用いたアーク放電型イオンプレーティングを利用した薄膜形成方法に関するものである。

## 【0002】

【従来の技術】従来、光学素子（ミラー等）の反射率を高める場合、この素子の表面に反射率を高める反射増加膜を成膜していた。この反射増加膜としては、一般にアルミニウムが使用され、各種薄膜形成方法により成膜（製造）されていた。薄膜形成方法は、大きく分けて真空蒸着とスパッタリング法の2つが知られている。

【0003】真空蒸着は、真空中で蒸着源を加熱して蒸発した分子を基板上に吸着（堆積）させることで成膜を行なうものである。イオンプレーティング法は真空蒸着の一種であり、プラズマ雰囲気中で蒸着を行なう方法である。この方法では蒸着源から蒸発した原子をイオン化してプラズマを生成すると共に、電界を与えてこのイオンを基板に衝突させることで基板上に成膜を行なう。このイオンプレーティング法には、プラズマの発生方法と蒸着源の構成によりいくつかの方法がある。例えば、真空容器内に高周波励起電圧を印加してグロー放電を起こすことで薄膜の性質を改善する高周波型イオンプレーティング法や、チャンパー内にホローカソードを導入してアーク放電を起こすホローカソード型イオンプレーティング法などが知られている。

【0004】スパッタリング法は、イオンをターゲットに衝突させることで生じるこのターゲット材料のスパッタリング作用を利用した成膜方法である。このスパッタリング法としては、電界と磁界とが直交するように印加するマグネトロン型スパッタリング法が知られている。

## 【0005】

【発明が解決しようとする課題】ところで、反射増加膜してアルミニウム薄膜を成膜する場合、前記従来の方法では高反射率のアルミニウム薄膜を効率良く成膜することができなかった。例えば、真空蒸着において蒸着源の加熱方法として抵抗加熱あるいは電子ビーム加熱方式を用いた場合、高真空（低い圧力）下での成膜は可能であるが成膜速度が遅くなる。また、蒸着物質がイオン化しないため、形成された膜が低密度の膜質になり易く高い

反射率が得られない。

【0006】高周波型またはホローカソード型のイオンプレーティング法では、真空蒸着同様蒸着物質がイオン化する割合が低く、また、低真空（比較的高い圧力）下で成膜が進行するため高反射率のアルミニウム薄膜が形成され難い。マグネトロン型スパッタリング法では比較的高い反射率のアルミニウム薄膜を形成することができ、プラズマによってターゲットがドーナツ状に侵食されてこのターゲットの使用効率が低下する。また、成膜速度も遅いため高効率で成膜することができない。

【0007】以上のように、従来の真空蒸着法、イオンプレーティング法、マグネトロン型スパッタリング法を用いた薄膜形成方法では、効率良く所望の高反射率のアルミニウム薄膜を製造することはできなかった。本発明は、このような課題を解決することを目的とする。

## 【0008】

【課題を解決するための手段】上記目的のために、本発明では、所定の圧力に設定された第1の真空中間でアーク放電によりプラズマを生成し、該プラズマを前記第1の真空中間よりも低い圧力に設定された第2の真空中間に設置された蒸着源に照射することで該第2の真空中間で成膜を行うアーク放電型イオンプレーティングによる金属薄膜の製造方法において、前記第2の真空中間の成膜時の圧力を $5 \times 10^{-4}$  Torr以下に設定した。

## 【0009】

【作用】本発明者らの研究によると、所定の圧力に設定された第1の真空中間でアーク放電によりプラズマを生成し、このプラズマを前記第1の真空中間よりも低い圧力に設定された第2の真空中間に導入する圧力勾配型プラズマ生成手段を用いたアーク放電型イオンプレーティングによって金属薄膜を製造する際に、前記第2の真空中間の成膜時の圧力を $5 \times 10^{-4}$  Torr以下に設定すると、高反射率を有する金属（例えばアルミニウム）薄膜が効率良く形成されることが分かった。これは、前記プラズマ生成手段によって前記第2の真空中間に生成したプラズマの密度が高いこと、および第2の真空中間内で薄膜を形成する位置（基板を設置する位置）付近の電離度が高いことに起因すると考えられる。また、前記第2の真空中間内が高真空であるため、形成する金属薄膜の膜中への不純物（薄膜構成物質以外の粒子等）の混入が抑制され、該金属薄膜が所望の金属のバルク密度に近い値を有する（所望の金属に近い膜質が得られる）ためと考えられる。

【0010】なお、本発明においては、成膜時にはプラズマ生成手段の放電ガスとして用いる不活性ガスAr、Heなどが前記第1の真空中間から第2の真空中間に導入される。従って、前記成膜時の第2の真空中間の圧力は、これら放電ガスの分圧に依存して決定されることになる。

## 【0011】

inert gas input involved in pressure control

【実施例】図1は、本発明を実施する際に使用した薄膜形成装置（イオンプレーティング装置）の概略構成図である。以下、図1に従って本発明のイオンプレーティング方法を説明する。この薄膜形成装置は、蒸着源を載置する蒸着源保持手段7、この保持手段7近傍に設置されたプラズマ収束用永久磁石8、基板12を支持する回転可能な基板ホルダ18、基板12上に形成された薄膜の膜厚を測定する水晶振動子からなる膜厚モニタ17、蒸着源からの蒸発粒子が基板12に到達するのを防ぐシャット15およびこれら各構成要件が設置された空間を真空状態にするステンレス（SUS304）製の真空容器6とを備えている。さらに、真空容器6に取り付けられた前記蒸着源を加熱する電子を含むプラズマを生成するプラズマ生成手段（電子銃）50と、この生成手段50と真空容器6との接続部に配置されたプラズマに外部から磁場を与えるための空芯コイル14と、基板ホルダ18およびこれに載置される基板12の電位が蒸着源保持手段7の電位に対して負の電位となるように設定するバイアス電源11と、を備えている。

【0012】蒸着源保持手段7は、図示していない水冷機構を有すると共に、プラズマ生成手段50の陽極を兼ねている。また、前述のようにバイアス電源11によって基板ホルダ18よりも高電位となるように構成される。真空容器6には、容器6内を所望の圧力に設定するための排気手段（図示せず）が設けられている。また、その壁面にはプラズマ生成手段50が設置され、この生成手段50によって生成されたプラズマ流が容器6内の空間に導入されるようになっている。

【0013】前記排気手段は、真空容器6に設けられた排気口9とこの排気口6に接続されたトラップを備えた油拡散ポンプと油回転ポンプ、補助バルブ、粗引きバルブ（共に図示せず）およびメインバルブ16等から構成される。図2は、本実施例で用いた薄膜形成装置のプラズマ生成手段50の概略構成図である。プラズマ生成手段50としては、「真空第25号第10巻」に記載されているような、複合陰極を用いた圧力勾配型プラズマ生成装置を使用した。

【0014】このプラズマ生成手段50は、一端に配置された陰極部、石英管22、環状の永久磁石52を内蔵した第1の中間電極3、第2の空芯コイル53を内蔵した第2の中間電極4、テフロン製の絶縁リング26、蒸着源保持手段を兼ねる陽極7（図1参照）、および主放電電源5（図1参照）とを有している。永久磁石52と第2の空芯コイル53には、図示していない冷却手段（冷却水の水路等）が設けられ、過度の加熱を防止するようになっている。

【0015】両中間電極3、4はリング状に形成されており、この両中間電極3、4と絶縁リング26と石英管22とによって、真空容器6に接続する空間が形成される。この空間のうち、特に陰極部に接する石英管22内

の空間をプラズマ生成室（第1の真空間）51とする。プラズマ生成手段50と真空容器6とは、第1の中間電極3、第2の中間電極4、および真空容器6に設けられたフランジ27とを中間電極取付けボルト29によって固定することにより接続される。なお、この取付けボルト29には絶縁被覆を形成してショートを防ぐようにしている。

【0016】絶縁リング26は、第1の中間電極3と第2の中間電極4との間、および第2の中間電極4とフランジ27との間にそれぞれOリング28を介して配置される。また、前記陰極部と石英管22、および石英管22と第1の中間電極3との接続部にもOリング28を配置してある。これにより、プラズマ生成室51を密閉状態を維持できるようになっている。

【0017】前記陰極部は、熱容量の小さいTa（タンタル）からなるパイプ状の補助陰極23、LaBe（六ホウ化ランタン）からなる円板状の主陰極2、両陰極をプラズマから保護するためのW（タングステン）からなる円板状の陰極保護板25、両陰極を収納するMo（モリブデン）からなる円筒（陰極管）24、冷却手段（冷却水の水路）21からなり、陰極マウント20により支持されている。補助陰極23は、ガス導入口1に接続されている。

【0018】ここで、プラズマ生成手段50による放電過程を説明する。前記陰極部のガス導入口1から放電ガス（キャリアガス）としてArガスを導入し、陰極部の近傍領域（前記第1の真空間）のガス圧を1 Torr程度に維持する。一方、前記排気手段により、真空容器6内の陽極（蒸着源保持手段）7の近傍領域の圧力が $2 \times 10^{-3}$  Torr程度となるように設定する。そして、この状態で主放電電源5により前記陰極部と陽極7との間に600 V前後の直流電圧を印加する。これにより、まず、補助陰極23の先端にグロー放電（1 A以下）を発生させる。このグロー放電（初期放電）によって、補助陰極23の先端がArガスの電離による逆流イオンの衝突によって加熱される。その結果、補助陰極23先端は熱電子を放出するようになり、放電電圧が徐々に低下して放電電流が増加する。補助陰極23の先端が2000℃以上に加熱されると、放電電圧は70 V前後、放電電流は30 A以上に達することが可能になる。この状態で2～3分すると、補助陰極23先端の放射熱により主陰極2が1700℃程度に間接的に加熱される。加熱された主陰極2からは大電流の熱電子放出が発生するため、この主陰極2が放電を生じさせる陰極として機能するようになる。この時点で、放電はアーク放電（最大250 A程度）となり、補助陰極23の温度は低下する。そのため、この補助陰極23の熱による損傷（消耗）は回避される。

【0019】始めから主陰極2をグロー放電のAr逆流イオンによって直接加熱しない理由は、主陰極2を構成するLaBeが低密度物質（比重4.6）で、高速逆流イオンに

Ar introduced  
1 Torr  
maintained in  
1st vac. space

← in vessel  
by use of  
evacuation

5

よってスパッタリングされてしまう恐れがあるからである。しかし、LaBeは熱電子放射特性が極めて良く、融点より著しく低い温度でも大電流密度の熱電子放出ができるため、大電流放電でも熱的消耗が小さく、長寿命であるという利点を有する。これに対し補助陰極23を構成するTaは、高密度物質(比重16.7)で前記初期放電によって生じるスパッタリング作用に対する耐久性を有するが、最終的な大電流密度の熱電子放射による温度上昇には極めて弱い。そのため、熱的消耗が激しく、短寿命であるという欠点を有する。そこで、本実施例で用いたプラズマ生成手段50では、陰極部を、初期放電時のスパッタリング作用に強いTaからなる補助陰極23と、最終の熱電子放射温度に強いLaBeからなる主陰極2とを組合わせた複合型LaBe陰極とした。

【0020】このような複合型LaBe陰極は、効率的で簡単な構成の放電用陰極として既に提案(特開平2-50577号公報)されているものであり、イオンの集積効率が良いという利点も有する。また、本実施例のプラズマ生成手段50は、陰極部と陽極7との間に中間電極3、4を配置することでこれら陰極と陽極間の空間を陰極側と陽極側とに分けると共に、陰極側の圧力を陽極側よりも高い圧力に維持した状態でプラズマを生成するように構成されている。そのため、例えば、陰極側の圧力を1 Torr程度、陽極側の圧力を $10^{-1}$ ~ $10^{-4}$  Torr程度の希望する値に設定してプラズマを生成することが可能である。このような構成のプラズマ生成手段は、圧力勾配型プラズマ生成手段と呼ばれている。この圧力勾配型プラズマ生成手段を用いると、成膜が行われる真空容器6内を高真空に保ちながら、プラズマ生成のために安定な放電を行なうことができる。また、圧力差により主陰極2に対するイオンの逆流がほとんど無いため、イオンの衝突による陰極の損傷を防止できる。また、陰極からの熱電子放出が低下し難い、陰極の寿命が長くなる、大電流放電が可能となる等の利点を有する。さらに、真空容器6内に反応ガスを導入してもこのガスがプラズマ生成室51に入り込む恐れがない。

【0021】次に、本薄膜形成装置での薄膜形成過程について説明する。まず、メインバルブ16の開度を調整しながら前記排気手段によって真空容器6内(第2の真空空間)の圧力が $1 \times 10^{-6}$  Torrになるように設定する。そして、蒸着源保持手段(陽極を兼ねる)7に蒸着源(原料)である純度99.99%のアルミニウムを載置し、主放電電源5により前記陰極部と陽極7との間に600 V程度の直流電圧を印加してプラズマを生成する。この時、前述のようにプラズマ生成手段(電子銃)50においては、前記陰極部のガス導入口1からの放電ガス(Ar)の導入により、陰極部の近傍領域(前記第1の真空空間)のガス圧は約1 Torr程度に維持される。また、陽極(蒸着源保持手段)7の近傍領域の圧力が約 $2 \times 10^{-3}$  Torrとなるように、前記排気手段によって真空容器6内

6

の圧力を設定する。これにより、プラズマ生成手段(電子銃)50の陰極部付近でアーク放電が生じ、前記放電ガスがプラズマ化される。生成されたプラズマは、第1の中間電極3および第2の中間電極4によりプラズマ生成室51から陽極7側(真空容器6内部側)に引き出される。このプラズマは、中間電極に内蔵された永久磁石52と第2の空芯コイル53および空芯コイル14によって円柱状に収束され、プラズマ流13として真空容器6内に導かれる。そして、このプラズマ流13は、陽極(蒸着源保持手段)7の下部近傍に設置されたプラズマ収束用永久磁石8の磁場によって進路を変えられて蒸着源保持手段7中の蒸着源に達し、この蒸着源(アルミニウム)を蒸発させる。この時、メインバルブ16の開度を調整して前記排気手段により真空容器6内の圧力が $2 \times 10^{-4}$  Torrとなるように制御する。その後、シャット15を開くと、蒸発した物質(アルミニウム粒子)はプラズマ13中を通ることによりイオン化されて、バイアス電源11により負の電位に保たれた基板12上に到達する。その結果、この基板12表面には薄膜状のアルミニウムが形成される。なお、薄膜の形成中は、膜厚モニタ17によって薄膜の膜厚と成膜レート(蒸発速度)を測定できるので、所定の膜厚となった時点で成膜を止めればよい。

【0022】本実施例では基板12として鏡面研磨した直径30mmの円形の石英ガラスを用意し、この基板12上に厚さ0.3  $\mu$ mのアルミニウムの薄膜を製造(成膜)した。その時の成膜条件を以下に示す。

真空容器内の到達圧力(真空度)	: $1 \times 10^{-6}$ Torr
成膜時の真空容器内の圧力(真空度)	: $2 \times 10^{-4}$ Torr
放電ガスAr流量	: 20 CC/分
蒸着源	: 純度99.99%の
アルミニウム	
成膜速度	: 3 $\mu$ m/分
基板温度	: 50℃以下

本実施例で製造(成膜)されたアルミニウムの薄膜の絶対反射率を、入射角12°の絶対反射治具を使用した紫外可視分光光度計(島津製作所製、UV-3100型)を使用して測定した。測定光には測定波長340~700nmの光を用い、この測定光をアルミニウム薄膜に照射した。この測定結果を図3に示す。

【0023】〔比較例1〕比較例として電子ビーム加熱方式の真空蒸着装置を用いて下記の成膜条件を設定し、実施例と同様の基板上に厚さ0.3  $\mu$ mのアルミニウムの薄膜を真空蒸着により製造(成膜)した。

真空容器内の到達圧力(真空度)	: $5 \times 10^{-5}$ Torr
成膜時の真空容器内の圧力(真空度)	: $6 \times 10^{-5}$ Torr
蒸着源	: 純度99.99%の
アルミニウム	
成膜速度	: 0.7 $\mu$ m/分
基板温度	: 50℃以下

本比較例で製造（成膜）されたアルミニウムの薄膜の絶対反射率を、実施例と同様にして測定した。この測定結果を図3に示す。本比較例で得られたアルミニウム薄膜は、図3に示すように波長 340～700nm の光に対して高い反射率を示すが、成膜速度は実施例よりも遅く生産性が低かった。

【0024】〔比較例2〕比較例として、マグネトロン型スパッタリング装置を用いて下記の成膜条件を設定し、実施例と同様の基板上に厚さ0.3 μm のアルミニウムの薄膜をスパッタリングにより製造（成膜）した。

真空容器内の到達圧力（真空度） :  $1 \times 10^{-5}$  Torr  
 成膜時の真空容器内の圧力（真空度） :  $3 \times 10^{-3}$  Torr  
 Arガス流量 : 80 cc/分  
 高周波パワー : 0.9kW  
 ターゲット : 純度99.99 % のアルミニウム  
 成膜速度 : 0.03 μm/分  
 基板温度 : 50℃以下

本比較例で製造（成膜）されたアルミニウムの薄膜の絶対反射率を、実施例と同様にして測定した。この測定結果を図3に示す。本比較例で得られたアルミニウム薄膜は、図3に示すように波長 340～700nm の光に対して高い反射率を示す。しかし、成膜速度は実施例よりも遅く、また、ターゲットの使用効率が悪いため生産性は低かった。

【0025】〔比較例3〕比較例として、実施例と同様のアーク放電型イオンプレーティング装置を用いて下記のように成膜時の真空容器内の圧力を  $5 \times 10^{-4}$  Torr を超える値（実施例よりも低真空）に設定し、実施例と同様の基板上に厚さ0.3 μm のアルミニウムの薄膜を製造（成膜）した。

【0026】  
 真空容器内の到達圧力（真空度） :  $1 \times 10^{-6}$  Torr  
 成膜時の真空容器内の圧力（真空度） :  $1 \times 10^{-3}$  Torr  
 放電ガスAr流量 : 20 CC/分  
 蒸着源 : 純度99.99 % のアルミニウム  
 成膜速度 : 3 μm/分  
 基板温度 : 50℃以下

本比較例で製造（成膜）されたアルミニウムの薄膜の絶対反射率を、実施例と同様にして測定した。この測定結果を図3に示す。本比較例で製造（成膜）されたアルミニウム薄膜は実施例で製造されたものよりも反射率が低く、測定波長域で90%以上の反射率は得られなかった。

【0027】

【発明の効果】以上のように、本発明によれば、金属薄膜を効率良く製造（成膜）することができる。そして、本発明を用いてアルミニウム薄膜を製造（成膜）すると、可視光（波長 340～700nm）に対する絶対反射率が

ほぼ90%以上のアルミニウムの薄膜を効率良く製造（成膜）することができる。その結果、このアルミニウム薄膜を光学面に形成した光学素子（ミラー等）を高効率で製造することができ、製造コストの削減が可能となる。

【0028】また、本発明では成膜時に基板を加熱する必要がないため、成膜に用いる薄膜形成装置の構成が簡単になる。さらに、熱に弱い基板にも金属薄膜を形成することも可能になる。

【図面の簡単な説明】

【図1】は、本発明を実施する際に使用した薄膜形成装置（アーク放電型イオンプレーティング装置）の概略立断面構成図である。

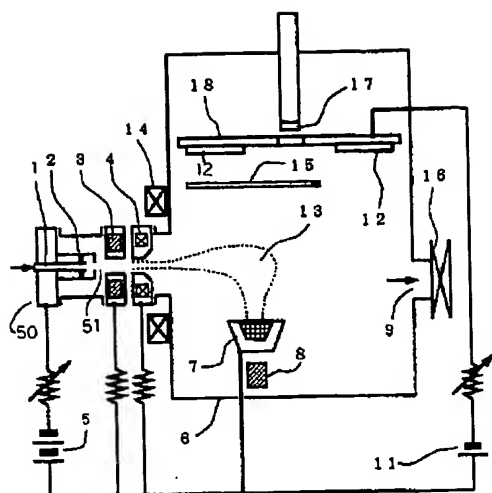
【図2】は、図1の薄膜形成装置に用いたプラズマ生成手段の概略立断面構成図である。

【図3】は、各種薄膜形成装置で製造（成膜）したアルミニウム薄膜の可視光（波長 340～700nm）に対する絶対反射率を示す特性図である。

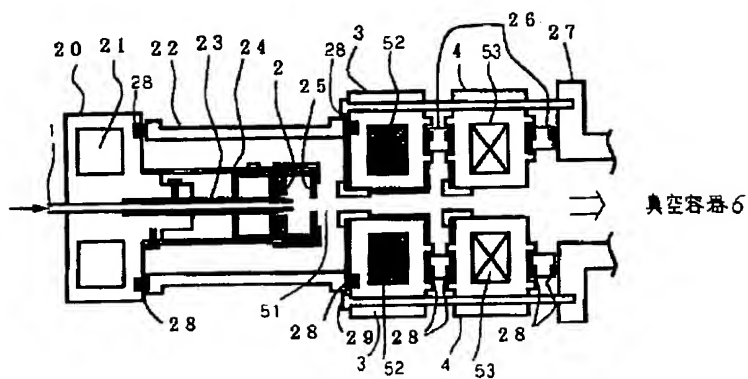
【主要部分の符号の説明】

- 1 ガス導入口
- 2 主陰極
- 3 第1の中間電極
- 4 第2の中間電極
- 5 主放電電極
- 6 真空容器
- 7 蒸着源保持手段（兼陽極）
- 8 プラズマ収束用永久磁石
- 9 排気口
- 11 バイアス電源
- 12 基板
- 14 空芯コイル
- 15 シャッター
- 16 メインバルブ
- 17 膜厚モニタ
- 18 基板ホルダ
- 20 陰極マウント
- 21 冷却手段
- 22 石英管
- 23 補助陰極
- 24 円筒（陰極管）
- 25 陰極保護板
- 26 絶縁リング
- 27 フランジ
- 28 Oリング
- 29 中間電極取付けボルト
- 50 プラズマ生成手段（電子銃）
- 51 プラズマ生成室
- 52 永久磁石
- 53 第2の空芯コイル

【図1】



【図2】



【図3】

